

文章编号:1671-1637(2026)07-0015-12

多源动态检测数据驱动的高速铁路轨道板 周期性不平顺诊断方法

魏子龙¹, 孙宪夫^{*1}, 杨飞¹, 张航²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 基础设施检测研究所, 北京 100081;

2. 国家铁路局规划与标准研究院, 北京 100055)

摘要:为实现高速铁路轨道板周期性不平顺的精准识别与科学评价,本文基于高速综合检测列车采集的轨道几何和车辆动态响应数据,提出了多源动态检测数据里程同步处理与周期性特征提取方法,获取了多源动态检测数据在轨道板周期性不平顺区段的时域、频域特征;构造了融合同步压缩小波变换与变形量计数法的轨道板周期性不平顺识别方法,并进一步结合构架垂向加速度提出了轨道板周期性不平顺综合评价方法。研究结果表明:提出的识别方法能够有效筛查轨道板周期性不平顺区段并判定其严重程度,当滑动窗长度取50 m,轨道板周期性不平顺变形量Ⅰ、Ⅱ级阈值分别取0.8、1.5 mm,对应比例参数均取3/4时,可在识别准确率与漏检率之间达到较好的平衡,识别准确率达92%;基于3条轨道板周期性不平顺较为显著的高铁线路实测数据,得出4~7 m波段构架垂向加速度与轨道板周期性不平顺存在较强的相关性,4~7 m波段构架垂向加速度95%分位数处在 $3.9\sim 8.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,可将4~7 m波段构架垂向加速度按连续5波超出阈值 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 来评价轨道板周期性不平顺的影响。该方法可为精准诊断高铁轨道服役状态、科学指导养护维修作业提供技术参考。

关键词:高速铁路;无砟轨道;周期性不平顺;多源动态检测数据;诊断方法;同步压缩小波变换;变形量计数法

中图分类号:U216.3 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.101

Diagnosis method for periodic irregularity of track slab on high-speed railway driven by multi-source dynamic inspection data

WEI Zi-long¹, SUN Xian-fu^{*1}, YANG Fei¹, ZHANG Hang²

(1. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited,

Beijing 100081, China; 2. Planning and Standard Research Institute of the National Railway

Administration, Beijing 100055, China)

Abstract: To achieve precise identification and scientific evaluation of periodic irregularity of track slabs on high-speed railway, based on the track geometry and vehicle dynamic response data collected from high-speed comprehensive inspection trains, a method for synchronous mileage

出版历程:2025-06-05 收稿,2025-08-15 修回,2025-10-27 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52308473);中国国家铁路集团有限公司科技研究计划项目(K2024T006);中国铁道科学研究院集团有限公司科技研究开发计划项目(2024YJ244)

作者简介:魏子龙(1988-),男,山东莱芜人,副研究员,工学博士,E-mail:weizl1988@163.com。

*通信作者:孙宪夫(1995-),男,辽宁丹东人,助理研究员,E-mail:sunxf95@163.com。

引用格式:魏子龙,孙宪夫,杨飞,等.多源动态检测数据驱动的高速铁路轨道板周期性不平顺诊断方法[J].交通运输工程学报,2026,26(7):15-26.

Citation:WEI Zi-long, SUN Xian-fu, YANG Fei, et al. Diagnosis method for periodic irregularity of track slab on high-speed railway driven by multi-source dynamic inspection data[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(7): 15-26.

treatment and periodic feature extraction from multi-source dynamic inspection data was proposed, and the time-domain and frequency-domain characteristics of multi-source dynamic inspection data in the periodic irregularity section of track slab were obtained. A method for identifying periodic irregularity of track slabs was constructed by integrating synchrosqueezed wavelet transform and deformation counting method. A comprehensive evaluation method for the periodic irregularity of track slabs was proposed by combining the vertical acceleration of the frame. Research results indicate that the proposed identification method can effectively capture the periodic irregularity of track slabs and evaluate the severity. As the sliding window length is set to 50 m, the threshold values for periodic irregularity deformation of track slabs are set to 0.8 mm for level I and 1.5 mm for level II, with the corresponding proportional parameters both set to 3/4; a good balance can be achieved between identification accuracy and missed detection rate, and the identification accuracy can reach 92%. Based on measured data from three high-speed railway lines with significant periodic irregularity of track slabs, it is concluded that there is a strong correlation between the vertical acceleration of the frame and periodic irregularity of track slabs in the 4-7 m wavelength band. The 95% quantile of the vertical acceleration of the frame in the 4-7 m wavelength band is between 3.9 and $8.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. The vertical acceleration of the frame in the 4-7 m wavelength band can be evaluated for the impact of periodic irregularity of track slabs by exceeding the threshold of $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ for 5 consecutive waves. This method provides guidance for accurately diagnosing the service status of high-speed railway tracks and scientifically conducting maintenance and repair operations.

Keywords: high-speed railway; ballastless track; periodic irregularity; multi-source dynamic inspection data; diagnosis method; synchrosqueezed wavelet transform; deformation counting method

Publication history: Received 2025-06-05; Received in revised form 2025-08-15; Accepted 2025-10-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (52308473); Science and Technology Research and Development Project of China State Railway Group Co., Ltd. (K2024T006); Science and Technology Research and Development Project of China Academy of Railway Sciences Corporation Limited (2024YJ244)

* **Corresponding author:** SUN Xian-fu, research assistant, E-mail: sunxf95@163.com.

0 引 言

无砟轨道结构具有高整体性、高平顺性、高稳定性等特点,因而中国设计时速 350 km 高速铁路普遍采用无砟轨道,部分设计时速 250 km 高速铁路亦采用无砟轨道。无砟轨道在中国高铁十余年的运用表明,在环境温度荷载、基础变形、列车荷载等长期作用下,轨道板会产生与其板长相关的结构变形,并经扣件向上传递至钢轨,进而在轨面形成周期性不平顺。轨道板周期性不平顺会影响高速行车的平稳性和舒适性,缩短车轨部件的维修周期和使用寿命,甚至会危及行车安全^[1],因此迫切需要及时、准确地识别和评估轨道板周期性不平顺问题。

在轨道板周期性不平顺的产生机理方面,赵国堂等^[2]发现 CRTS I 型轨道板在较大的正温度梯

度下会产生椭圆形臃曲变形,轨道板侧边逐渐出现脱空,支承状态由 4 边支承转变为 4 角支承。Ren 等^[3]研究了季节性冻土地地区路基冻胀对 CRTS III 型轨道板变形与层间脱空的影响,发现路基冻胀范围及其与轨道板的相对位置对轨道板垂向位移和层间脱空高度的影响显著。赵磊等^[4-5]针对不同型号无砟轨道,研究了板内温度梯度和自密实混凝土收缩对周期性变形的影响规律,得出正温度梯度下钢轨与轨道板变形特征呈现板中高、板端低,负温度梯度下与之相反,提出可通过合理预设初始不平顺来减缓运营期轨道板周期性不平顺。CRTS II 型板式无砟轨道相对特殊,其纵连结构易受温度影响而产生上拱失稳风险,Zhou 等^[6-7]研究了连续高温和高原高寒环境下 CRTS II 型轨道板的力学和变形行为。在轨道板周期性不平顺的时空特征方面,康熊等^[8]发

现轨道板周期性不平顺在轨道不平顺谱中存在相应的谱峰。陈宪麦等^[9-10]结合数值仿真分析了CA砂浆脱空病害条件下的轨道板振动响应特征。杨飞等^[11-12]指出轨道板周期性不平顺在CRTS I~Ⅲ型板式以及单元双块式无砟轨道区段均有分布,周期性不平顺的特征波长集中在4~7 m。在轨道板周期性不平顺对车辆运行的影响方面,李再帛等^[13]采用响应面和轮轨动力学相结合的方法,研究了CRTS II型板式无砟轨道随机不平顺对高速列车运行安全性的影响。田新宇等^[14]分析了轨道板不平顺检测数据的弦测特征及其对车辆动力学性能的影响,并提出采用5 m中点弦评估轨道板周期性不平顺。Li等^[15]研究了桥梁徐变和轨道板上拱条件下车辆运行安全性和舒适性特征,得出轨道板变形阈值为4 mm,二者叠加变形阈值为10 mm。

高速综合检测列车作为中国高速铁路网中唯一能够以线路运营速度开展等速检测的综合性检测装备,其搭载的轨道几何、车辆动态响应等检测系统为轨道病害诊断提供了丰富的数据源^[16-17]。在基于轨道几何检测数据的轨道板变形识别方面,赵文博等^[18]结合小波变换和支持向量机识别轨道周期性不平顺。Tang等^[19]基于无监督学习,利用完全无监督和少样本微调2种框架识别轨道板上拱,降低了人工标记的工作量。需要指出,仅通过轨道几何单一数据源存在一定的误报或漏报问题,且无法反映轨道板周期性不平顺对车辆动态响应的影响程度。为此,车辆动态响应数据除了用于评估车辆异常振动、蛇行稳定性等运行状态^[20-21],也可用于间接识别和评价轨道几何状态。钟阳龙等^[22]建立了多车-无砟轨道-路基耦合动力学模型,分析了路基不均匀沉降对车辆动力学的影响规律,并提出用于评估路基不均匀沉降的沉降时变率指标。Xu等^[23]指出车体和构架垂向加速度中蕴含基础长波长沉降引起的动态特性,轴箱垂向加速度对基础短波长沉降更为敏感,并以车体、构架和轴箱垂向加速度为输入,建立多通道一维卷积神经网络识别路基沉降。Ma等^[24]基于车体垂向加速度,结合模态分解和连续小波变化提取4~6 m波长成分来识别轨道板上拱。

综上所述,当前针对轨道板周期性不平顺的形成机理、分布特征、对行车的影响已开展了诸多研究,轨道几何与车辆动态响应检测数据也逐步应用于路基沉降识别、轨道板上拱预警、大值偏差预警等。然而,既有轨道板周期性不平顺识别的相关研究大都依赖轨道几何幅值、波长等简单阈值,尚难以反映不平顺

发展变化特征,也难以科学评估轨道板不平顺对车辆响应的影响程度,亟需结合轨道几何、车辆动态响应等多源数据开展轨道板周期性不平顺的快速识别和综合评估方法研究。针对上述问题,本文首先提出轨道几何及车辆动态响应等多源动态检测数据分析方法,分析多源数据在典型波段的分布特征;随后,研究基于轨道几何的轨道板周期性不平顺快速识别方法,并通过实测数据讨论识别参数的合理性;最后,提出融合构架垂向加速度的轨道板周期性不平顺综合评价方法,并讨论评价阈值的合理性。利用多源动态检测数据开展病害的识别与评估,形成系统的轨道板周期性不平顺诊断方法,以期科学评判高铁轨道服役状态,有效指导养护维修作业提供参考。

1 轨道板周期性不平顺区段的多源动态检测数据预处理与特征分析

1.1 轨道板周期性不平顺的频谱特征

多源动态检测数据采集自高速综合检测列车的轨道几何检测系统、车辆动态响应检测系统、综合系统等。其中,轨道几何检测系统用于获取轨道动态不平顺与车体加速度数据,车辆动态响应检测系统用于获取轴箱、构架与车体的加速度数据,综合系统则用于发布列车的速度、时间和里程信息^[17]。本文轨道板周期性不平顺表征数据采用动态高低不平顺,车辆动态响应表征数据采用垂向加速度。

选取4条不同类型无砟线路的轨道动态不平顺数据,利用Welch修正周期图法计算各板型的高低不平顺功率谱密度(Power Spectral Density, PSD),结果如图1所示。由图1可见,I型板式无砟轨道高低不平顺谱在板长4.7、5.0 m处存在显著谱峰,II型板式和单元双块式无砟轨道均在板长6.5 m处存在显著谱峰,III型板式的谱峰则集中在板长5.4 m处。各型

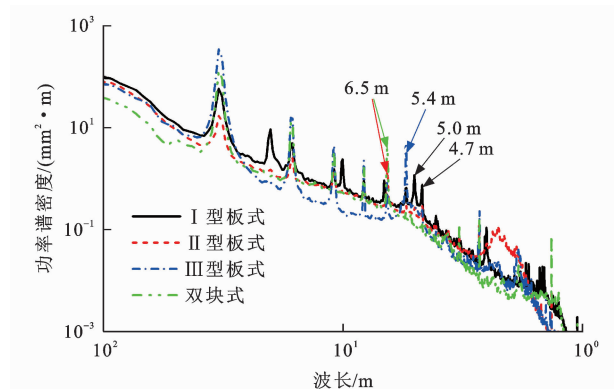


图1 高低不平顺功率谱密度

Fig. 1 PSD of longitudinal level

无砟线路均存在由轨道板变形引起的周期性不平顺,其特征波长与轨道板板长密切相关,主要分布在 4~7 m。此外,各型无砟轨道高低不平顺谱在 32.7 m 附近均存在由简支梁周期性不平顺引起的谱峰,而简支梁周期性不平顺并非标准的三角函数,因此,在其倍频 16.4、10.9、8.2 m 附近也发现谱峰。以某Ⅲ型板式无砟轨道线路为例,高速综合检测列车实测车体、构架和轴箱垂向加速度的功率谱如图 2 所示。可以看出,车辆各部件垂向加速度均在波长 5.4 m 附近存在明显的能量集中,轨道板周期性不平顺诱发走行部件固定波长振动并向上传递至车体。

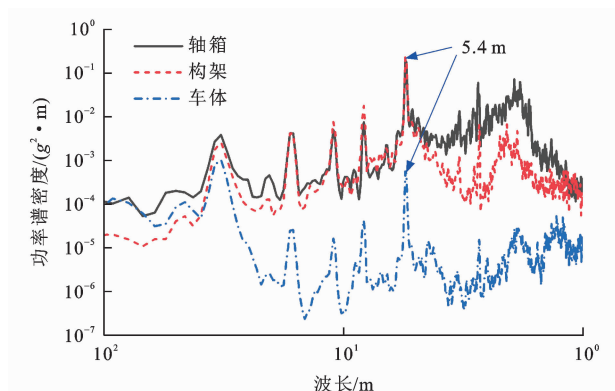


图 2 车辆动态响应功率谱密度

Fig. 2 PSD of vehicle dynamic response

1.2 轨道板周期性不平顺提取方法

由第 1.1 节可知轨道板周期性不平顺的特征波长集中在 4~7 m,而高速综合检测列车可同时采集 3 个波段的高低不平顺数据,包括 1.5~42.0、1.5~70.0、1.5~120.0 m。为有效提取轨道板周期性不平顺所在的 4~7 m 波长成分,选用 3 个通道中波段最窄的 1.5~42.0 m 高低不平顺作为分析对象。

周期性特征的提取既要掌握轨道板周期性不平顺的波长信息,又要得到位置信息,因此,使用连续小波变换分析高低不平顺时频分布特征,小波基采用 Bump 小波。传统小波变换的能量聚集性相对较差,时频能量弥散在信号的脊线周围。考虑到轨道板周期性不平顺特征波段分布较窄,因此,利用时频后处理进一步提升时频分析质量。为保证时频后处理不破坏信号的重构能力,在连续小波变换基础上,通过频率重排同步压缩变换算法来提升小波时频表示的能量聚集性^[25]。将某高铁 K327+500~K328+500 实测 1.5~42.0 m 高低不平顺按上述 2 种方法计算时频分布,结果如图 3 所示。其中,K327+821~K328+197 区段时频分布在波长 32 m 及其倍频 16 m 附近存在明显的能量集中,这主要由连

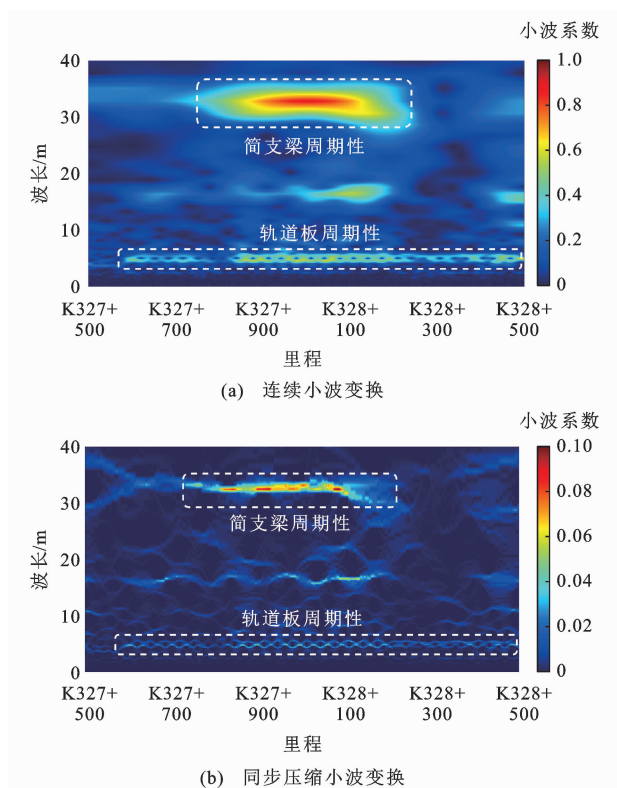


图 3 高速铁路典型周期性轨道不平顺的时频分布

Fig. 3 Time-frequency distribution of typical periodic track irregularity on high-speed railway

续敷设的简支梁变形引起;K327+588~K328+500 区段时频分布在波长 5 m 左右存在明显的能量集中,这与轨道板周期性不平顺相关。对比图 3(a)和(b)发现,小波系数在经过频率重排同步压缩后,上述特征波长的能量聚集性均得到显著提升。

为重构出仅涵盖轨道板周期性不平顺特征波长的信号,对频率重排后 4~7 m 波段小波系数进行逆小波同步压缩变换,获得轨道板周期性不平顺时域波形。

1.3 车辆动态响应数据同步与周期性特征提取方法

1.3.1 多源动态检测数据里程同步处理

高速综合检测列车检测的轨道动态不平顺数据按 4 m⁻¹等空间间隔同步采样,车辆动态响应数据则按 5 kHz 等时间间隔同步采样。尽管轨道动态不平顺和车辆动态响应数据均有里程信息,但两者里程并不同步,需对车辆动态响应数据里程进行修正。轨道动态不平顺和车辆动态响应数据均包含车体垂、横向加速度,同一列高速综合检测列车上述 2 套检测系统采集的车体加速度数据波形相似性很高,利用这一特征可实现多源动态检测数据里程同步。具体方法如下。

步骤 1:轨道动态不平顺数据中的车体垂向加速度 $a_{z,geo,1}$ 已按 20 Hz 低通滤波处理,将车辆动态响应数据中的车体垂向加速度 $a_{z,cit,1}$ 按 20 Hz 低通

滤波,记为 $a_{z,cit,2}$ 。

步骤2:将车辆动态响应数据中的车速 v_{cit} 进行一次积分得到列车累积行驶距离 l_{cit} ,结合车辆动态响应数据的起点里程和列车前进方向计算累积里程 $x_{cit,2}$ 。以累积里程 $x_{cit,2}$ 为横坐标,20 Hz 低通滤波后的车体垂向加速度 $a_{z,cit,2}$ 为纵坐标,按 4 m^{-1} 等空间间隔重采样,重采样后分别记为 $x_{cit,3}$ 和 $a_{z,cit,3}$ 。以 $350\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速检测工况为例,重采样后1 km 数据采样点数由原来的51 428个降至4 000个,数据量降低92%,转换到空间域有助于提升运算效率。

步骤3:以轨道动态不平顺数据的车体垂向加速度 $a_{z,geo,1}$ 为基准,将重采样的车体垂向加速度 $a_{z,cit,3}$ 按固定单元长度分段。利用相关性最优原则修正每个单元重采样的车体垂向加速度 $a_{z,cit,3}$,得到校正后的里程 $x_{cit,4}$ 。

步骤4:校正后的里程 $x_{cit,4}$ 为按 4 m^{-1} 等空间间隔采样数据,将其逆推至原按5 kHz 采样的车辆动态响应数据,对应里程记为 $x_{cit,5}$ 。

按上述方法校正后的车辆动态响应数据如图4所示,校正前车辆动态响应数据最大里程误差为122 m,校正后2种数据源的车体垂向加速度波形匹配度高,里程误差得到修正。

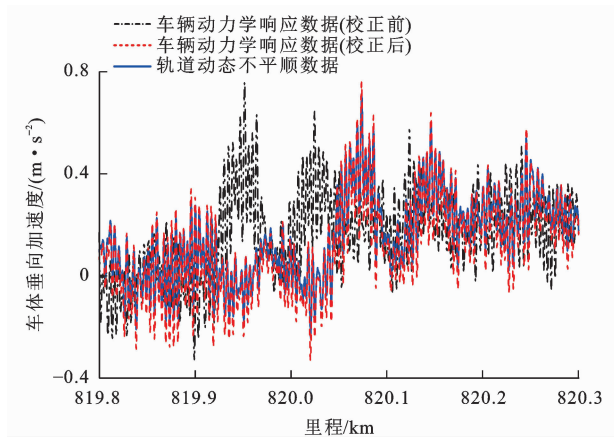


图4 车辆动态响应数据里程校正效果

Fig. 4 Mileage correction effect of vehicle dynamics response data

1.3.2 车辆动态响应数据周期性特征提取

轨道板周期性不平顺对车辆系统激励的波长相对固定,集中在与板长密切相关的4~7 m波段,当车速由 $10\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 提升至 $350\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,4~7 m 波段轨道板周期性不平顺对车辆系统激励的频率由0.4~0.7 Hz 提升至13.9~24.3 Hz,可见激励频率随车速变化而变化。因此,为分析轨道板周期性不平顺的影响,需要将车辆动态响应数据由时间域转换至空间域来处理。具体方法如下:

步骤1:若直接对按高频采集的车辆动态响应数据进行空间采样,输出信号会产生低频混叠现象。因此,先利用FIR低通滤波器滤除不影响分析结果的高频成分,压缩信号频带。

步骤2:引入车速 v_{cit} ,对低通滤波后的车辆动态响应数据等空间重采样,采样频率与轨道动态不平顺数据一致,即 4 m^{-1} 。

步骤3:利用FIR带通滤波器对重采样的车辆动态响应数据按4~7 m波段带通滤波。

以某高铁实测数据为例,按上述方法计算4~7 m波段车体、构架和轴箱垂向加速度,结果如图5

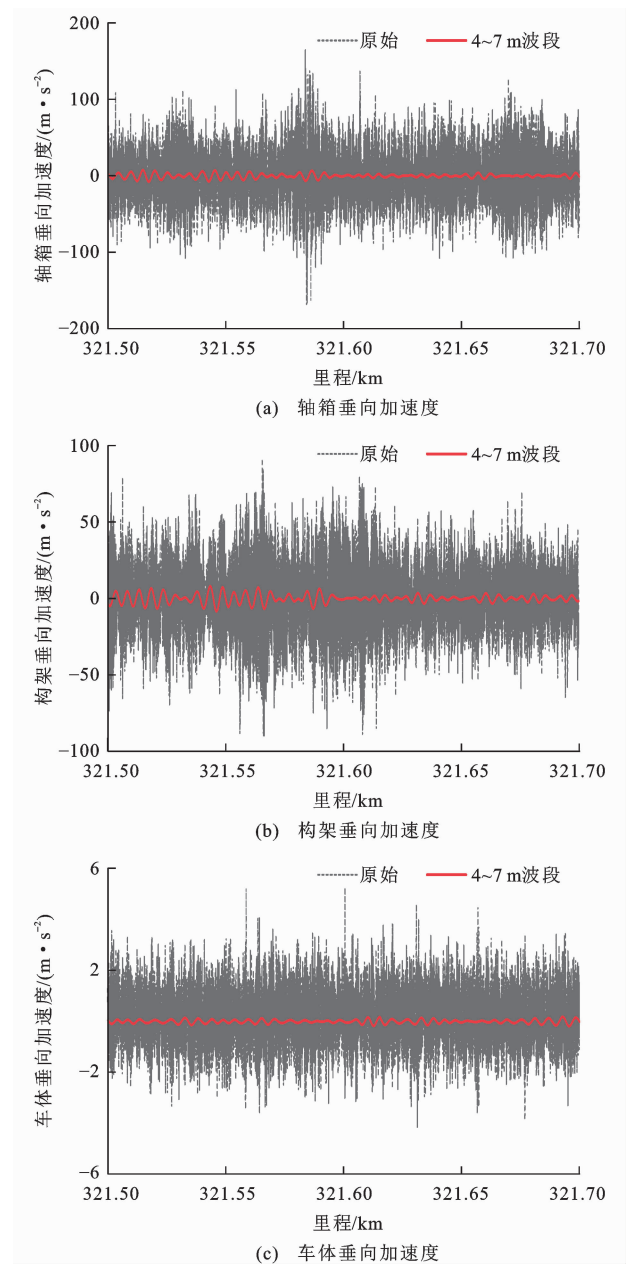


图5 车辆动态响应数据4~7 m带通滤波效果

Fig. 5 4-7 m bandpass filtering effect on vehicle dynamics response data

所示,滤波前上述信号的最大值分别为 169.5、94.1、5.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,4~7 m 带通滤波后的最大值分别降至 7.6、8.4、0.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

1.4 4~7 m 波段高低不平顺与车辆动态响应数据幅值分布特征

选取 3 条轨道板周期性不平顺较为显著的高铁线路为对象,分析检测数据特征,其中线路 1 包含 CRTS II、III 型板式和单元双块式无砟轨道,单个行别数据长度超过 1 000 km;线路 2 包含 CRTS I 型板式和单元双块式无砟轨道,单个行别数据长度超过 400 km;线路 3 包含 CRTS I、III 型板式和单元双块式无砟轨道,单个行别数据长度超过 1 000 km。线路 1 和线路 2 来源于 CRH380B 型高速综合检测列车,线路 3 数据来源于 CRH380A 型高速综合检测列车。因轨道板周期性不平顺幅值呈季节性变化特征^[14],每条线路选取夏季和冬季共 2~4 组的检测数据,共计 9 组多源检测数据。

高低不平顺数据按第 1.2 节方法计算 4~7 m 波段的同步压缩小波变换重构信号,车辆动态响应数据按第 1.3 节方法计算 4~7 m 带通滤波信号,然后提取上述信号的波峰、波谷值。选取的 3 条高铁线路实际运营速度在 300 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,考虑到车辆动态响应幅值与车速密切相关,因此,进一步筛选出车速在 290~310 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 区间的波峰、波谷值作为分析对象,取上述波峰、波谷的绝对值并计算累积分布曲线的 95% 分位数,结果见表 1。

表 1 4~7 m 波段高低不平顺及车辆动态响应的 95% 分位数

Table 1 95% percentile of longitudinal level and vehicle dynamic response of 4-7 m wavelength band

数据集	数据集名称	4~7 m 波段高低不平顺/mm	4~7 m 波段垂向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			
			左侧轴箱	右侧轴箱	构架	车体
1	线路 1test1	0.39	4.4	4.4	5.4	0.36
2	线路 1test2	0.46	4.5	5.0	3.9	0.18
3	线路 1test3	0.51	4.7	4.9	4.3	0.23
4	线路 2test1	0.52	5.2	9.3	4.5	0.13
5	线路 2test2	0.52	5.4	10.1	4.8	0.14
6	线路 2test3	0.53	5.5	10.4	5.6	0.13
7	线路 2test4	0.58	6.6	11.7	6.2	0.14
8	线路 3test1	0.67	7.1	13.3	6.9	0.12
9	线路 3test2	0.69	8.7	7.9	8.5	0.10

由表 1 可知,线路 1、2、3 的 4~7 m 波段高低不平顺 95% 分位数分别处在 0.39~0.51、0.52~0.58、0.67~0.69 mm,3 条线路周期性不平顺幅值呈现依次增大趋势。对应 3 条线路的 4~7 m 波段

轴箱垂向加速度 95% 分位数分别处在 4.4~5.0、5.2~11.7、7.1~13.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,尽管也呈现依次增大趋势,但对于线路 2、3 而言,4~7 m 波段右侧轴箱垂向加速度 95% 分位数约为左侧的 2 倍,同一轮对两侧轴箱的振动水平差异过大,说明轴箱垂向加速度并不适宜用于评估轨道板周期性不平顺;对应 3 条线路的 4~7 m 波段车体垂向加速度 95% 分位数分别处在 0.18~0.36、0.13~0.14、0.10~0.12 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,线路 1~3 依次递减,与 4~7 m 波段高低不平顺的规律相反,说明车体垂向加速度也不适宜用于评估轨道板周期性不平顺;对应 3 条线路的 4~7 m 波段构架垂向加速度 95% 分位数分别处在 3.9~5.4、4.5~6.2、6.9~8.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,与 4~7 m 波段高低不平顺一样呈现依次增大趋势,因此,4~7 m 波段构架垂向加速度更适宜用于评估轨道板周期性不平顺。

由表 1 可知,4~7 m 波段构架垂向加速度 95% 分位数处在 3.9~8.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,因此,在后续评估轨道板周期性不平顺的影响时,4~7 m 波段构架垂向加速度评价阈值拟选用 5.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2 基于同步压缩小波变换与变形量计数法的轨道板周期性不平顺识别

2.1 识别方法及流程

线路 2 在 K238+070~K238+150 区段的高低不平顺数据如图 6 所示,按第 1.2 节计算其 4~7 m 波段重构信号,该区段共有 2 孔 32 m 简支梁,实测高低不平顺波形包含简支梁跨中上拱引起的波长 32.7 m 周期性成分;每孔简支梁上有 7 块轨道板,实测高低不平顺还叠加了轨道板引起的波长 5 m 左右的周期性成分。

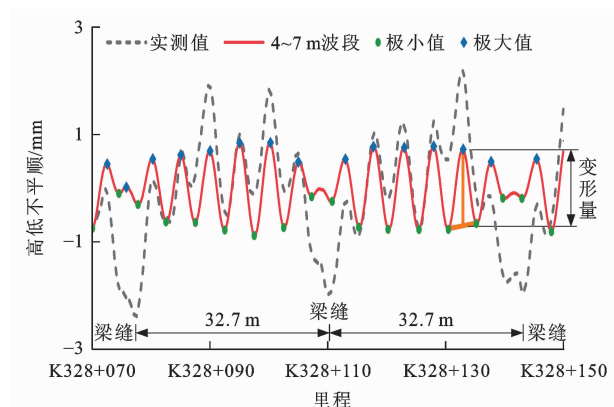


图 6 轨道板周期性不平顺提取

Fig. 6 Extraction of periodic irregularity of track slab

图 7 为基于同步压缩小波变换与变形量计数法

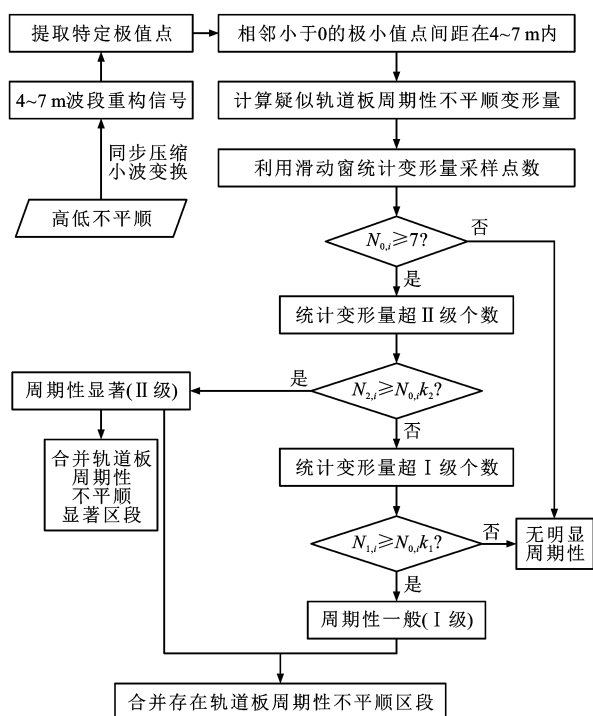


图 7 轨道板周期性不平顺快速识别方法

Fig. 7 Rapid identification method for periodic irregularity of track slab

的快速识别方法总体分析流程,具体步骤如下:

步骤 1:采用第 1.2 节所述方法将 4~7 m 波段的周期性不平顺从原始高低不平顺数据中分离出来,如图 6 所示;随后,提取 4~7 m 波段的周期性不平顺大于 0 的极大值点和小于 0 的极小值点,分别对应轨道板的板中和板端位置。

步骤 2:根据轨道板板长对结果进行一次筛选,当相邻极小值点的里程差在 4~7 m 内,且两极小值点之间存在极大值点时,判定该处存在一块轨道板。

步骤 3:提出轨道板周期性不平顺变形量概念,变形量的计算采用 3 点弦测法,等于上述极大值点幅值减去其两侧紧邻极小值点幅值的平均值。

步骤 4:轨道板周期性不平顺的位置、分布范围和变形量幅值具有随机性,若采用变形量连续超限的计数方式会导致评判规则过于苛刻,导致漏检率偏高。因此,结合实测数据特征,设计一种按比例计数的评判方法。在变形量计数分析时,以滑动窗的形式遍历所有变形量采样点。滑动窗长会影响变形量采样点数量,进而影响识别结果,考虑到同 1 孔简支梁上可能铺设不同长度的轨道板,不同长度轨道板的变形量也可能不同,因此,滑动窗长宜介于 1~2 倍梁长之间,可取 50 m。滑动距离主要影响识别结果的疏密程度,可取 10 m。从前向后滑动统计每个滑动窗中包含的变形量采样点数,其中第 i 个滑

动窗的变形量采样点数记为 $N_{0,i}$ 。窗长 50 m 时至少包含 7 块轨道板,当 $N_{0,i} \geq 7$ 时,则继续执行后续评判。

步骤 5:指定变形量 I、II 级阈值 A_1 、 A_2 ,统计每个滑动窗中变形量大于 I、II 级阈值的采样点数,分别记为 $N_{1,i}$ 和 $N_{2,i}$ 。分别指定变形量 I、II 级超限计数比例参数为 k_1 、 k_2 ,根据表 2 给出的评判规则来判断每个滑动窗是否存在轨道板周期性不平顺,并将轨道板周期性不平顺分为“周期性显著”“周期性一般”“无明显周期性”3 个等级。

表 2 轨道板周期性不平顺评判规则

Table 2 Evaluation rule for periodic irregularity of track slab

变形量计数结果	严重程度
$N_{2,i} \geq N_{0,i}k_2$	周期性显著(II级)
$N_{1,i} \geq N_{0,i}k_1$ 且 $N_{2,i} < N_{0,i}k_2$	周期性一般(I级)
$N_{1,i} < N_{0,i}k_1$ 且 $N_{2,i} < N_{0,i}k_2$	无明显周期性

步骤 6:针对“周期性显著”和“周期性一般”的滑动窗,需将相邻滑动窗所覆盖的里程合并为一个区段,并给出每处轨道板周期性不平顺区段的起终点里程。为进一步确定该区段的精确位置,需将小里程侧第 1 处变形量超过 I 级阈值 A_1 的位置作为区段起点,将大里程侧第 1 处变形量超过 I 级阈值 A_1 的位置作为区段终点。

步骤 7:最后仅针对相邻“周期性显著”的滑动窗所覆盖的里程合并为一个区段,每个区段起点为小里程侧第 1 处变形量超过 II 级阈值 A_2 的位置,终点为大里程侧第 1 处变形量超过 II 级阈值 A_2 的位置,得到“周期性显著”区段的里程范围。

2.2 识别参数合理性分析

2.2.1 轨道板周期性不平顺变形量阈值 A_1 、 A_2

无砟轨道普遍通过更换不同尺寸轨下垫板来调整轨道高程,轨下垫板标准件的最小厚度为 1 mm。当轨道板周期性不平顺变形量介于 0.75~1.25 mm 时,可以在轨道板周期性不平顺极大值位置处更换或撤下轨下垫板实现调整目的。当轨道板周期性不平顺变形量小于 0.75 mm 时,则无法通过调整轨下垫板标准件来消除该不平顺。因此,从工务维修的可实施性角度出发,轨道板周期性不平顺变形量 I 级阈值 A_1 不宜小于 0.75 mm,建议将 A_1 取 0.8 mm。

仍选用第 1.4 节的 3 条典型高铁线路来识别轨道板周期性不平顺,每条线路考虑 2 个行别以及不同季节,共计 12 条数据,对识别出的轨道板周期性不平顺区段作变形量的累积分布曲线,如图 8 所示。

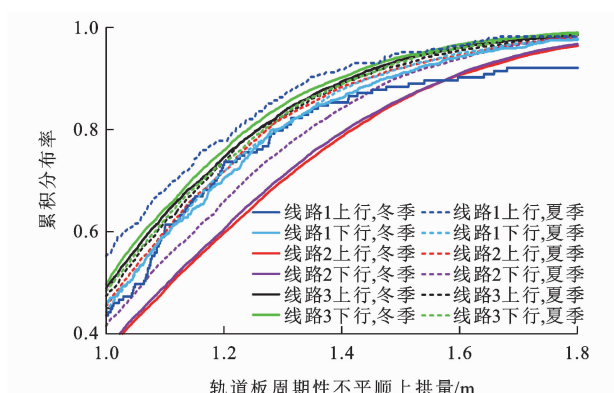


图8 轨道板周期性不平顺变形量累积分布

Fig. 8 Cumulative distribution of periodic irregularity deformation of track slab

考虑到现场检查和维修作业效率,重点复核区段占比不宜超过 5%,因此以轨道板周期性不平顺变形量的 95%分位数作为Ⅱ级阈值 A_2 。由图 8 可知,线路 1~3 中轨道板周期性不平顺变形量 95%分位数分别处在 1.50~1.63、1.62~1.73、1.54~1.58 mm。综上所述,对于存在轨道板周期性不平顺的区段,变形量 95%分位数处在 1.50~1.73 mm,说明当变形量大于 1.5 mm 时,轨道板周期性不平顺相对严重。可将轨道板周期性不平顺变形量Ⅱ级阈值 A_2 确定为 1.5 mm。

2.2.2 变形量超限计数比例参数 k_1 、 k_2

改变轨道板周期性不平顺变形量Ⅰ级超限计数比例参数 k_1 ,分别取 1/2、3/4 和 1,分析窗长为 50 m。按照图 7 所示流程分析完成后,复核每个窗口的识别结果,并将识别出存在轨道板周期性不平顺单元总数中复核通过的占比定义为识别准确率,统计结果见表 3。可以看出,比例参数 k_1 取 3/4 时,识别准确率达到最高的 92%。变形量Ⅱ级超限计数比例参数 k_2 作用是在发现轨道板周期性不平顺区段基础上,找出相对更严重的区段优先维护,与比例参数 k_1 保持一致即可,两者均可取 3/4。

表3 比例参数对识别准确率的影响

Table 3 Impact of proportional parameters on identification accuracy

比例参数 k_1	识别准确率/%
1/2	84
3/4	92
1	86

2.2.3 滑动窗长度

改变滑动窗长度,分别取 50、100、200 m,变形量Ⅰ级超限计数比例参数 k_1 为 2/3。按照图 7 所示流程分析完成后,复核每个窗口的识别结果,并计算

识别准确率。其中,窗长为 50、100、200 m 时识别存在周期性不平顺的单元中正确个数分别为 834、582、379 个。不同窗长下的识别准确率统计结果见表 4,表中,漏检率定义为各工况下识别准确的单元总数相较于窗长 50 m 时所减少的百分比。由表 4 可见,尽管增大窗长可以提升准确率,但提升效果不明显(如窗长 200 m 相较窗长 50 m 仅提升 5%);与之相比,漏检率随着窗长的增大快速提升,在窗长 200 m 时甚至超过 50%。综合考虑后,滑动窗长度推荐取 50 m。

表4 滑动窗长度对识别准确率的影响

Table 4 Impact of sliding window length on identification accuracy

滑动窗长度/m	识别存在周期性不平顺单元个数	识别准确率/%	相较于窗长 50 m 的漏检率/%
50	905	92	0
100	607	96	30
200	391	97	54

2.3 识别效果

基于某高铁实测高低不平顺数据开展轨道板周期性不平顺识别,计算得到 K283+700~K284+300 区段轨道板周期性不平顺变形量如图 9 所示,该区段为路基地段,变形量处在 0.11~2.70 mm。参照第 2.2 节的分析结果,滑动窗窗长取 50 m,变形量Ⅰ、Ⅱ级阈值分别取 0.8、1.5 mm,变形量超限计数比例参数均取 3/4。该区段识别结果如图 10 所示,可见 K283+840~K284+239 区段识别出轨道板周期性不平顺,其中,K283+943~K283+994 区段多数周期性不平顺变形量超过 1.5 mm,因此判定为显著区段,该区段附近轨道板周期性不平顺变形量见表 5,共识别出周期性显著区段 11 处,其中 9 处变形量大于 1.5 mm,其余 2 处介于 1.4~1.5 mm。由此可见,该方法可以从高低不平顺数据

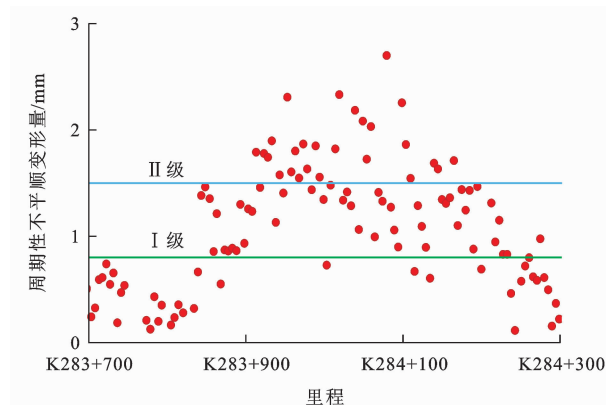


图9 轨道板周期性不平顺变形量

Fig. 9 Periodic irregularity deformation of track slab

表 5 轨道板周期性不平顺变形量统计
Table 5 Statistics of periodic irregularity deformation of track slab

序号	里程/km	变形量/mm	程度	序号	里程/km	变形量/mm	程度	序号	里程/km	变形量/mm	程度
1	283.893	1.30	一般	11	283.943	1.58	显著	21	283.994	1.55	显著
2	283.898	0.93	一般	12	283.948	1.40	显著	22	283.999	1.34	一般
3	283.903	1.26	一般	13	283.953	2.31	显著	23	284.003	0.73	一般
4	283.908	1.23	一般	14	283.958	1.60	显著	24	284.008	1.48	一般
5	283.913	1.79	一般	15	283.963	1.80	显著	25	284.014	1.82	一般
6	283.918	1.46	一般	16	283.968	1.55	显著	26	284.019	2.33	一般
7	283.923	1.78	一般	17	283.973	1.87	显著	27	284.024	1.34	一般
8	283.928	1.74	一般	18	283.978	1.63	显著	28	284.029	1.42	一般
9	283.933	1.90	一般	19	283.984	1.44	显著	29	284.034	1.28	一般
10	283.938	1.13	一般	20	283.989	1.85	显著	30	284.039	2.18	一般

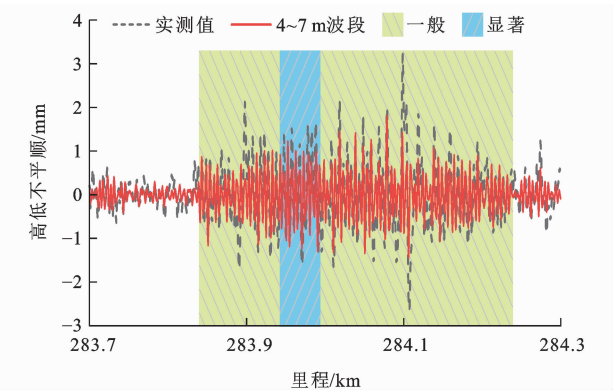


图 10 轨道板周期性不平顺识别结果
Fig. 10 Identification result of periodic irregularity of track slab
中识别出存在轨道板周期性不平顺区段,并表征其严重程度。

3 融合轨道几何与车辆响应的轨道板周期性不平顺综合评价

3.1 评价数据源选取

第 1.4 节中 3 条高铁线路的多源动态检测数据统计分析初步表明,4~7 m 波段构架垂向加速度累计分布的 95%分位数与 4~7 m 波段高低不平顺呈现较为显著的正相关关系。为进一步分析构架加速度评价轨道板周期性不平顺的适用性,同样以上述 3 条线路的实测 4~7 m 波段高低不平顺为横坐标,分别以实测 4~7 m 波段车体和构架垂向加速度为纵坐标,将全部采样点和仅含轨道板周期性不平顺区段的采样点作散点图,并对各散点图作线性拟合。3 条线路的 4~7 m 波段构架垂向加速度与高低不平顺的拟合斜率分别处在 6.3~13.7、7.6~11.2、11.1~11.7,呈现依次增大趋势。对应 3 条线路的 4~7 m 波段车体垂向加速度拟合斜率分别处在

0.181~0.492、0.020~0.036 和 0.027~0.036 之间,线路 1 明显大于其他 2 条线。

线路 1test3 的散点图如图 11 所示,对于无轨道板周期性不平顺的区段,4~7 m 波段车体、构架垂向加速度与高低不平顺的 Pearson 相关系数分别为 0.45、0.71;对于存在轨道板周期性不平顺的区段,其 Pearson 相关系数分别为 0.40、0.77。当存在轨道板周期性不平顺时,4~7 m 波段构架垂向加速度

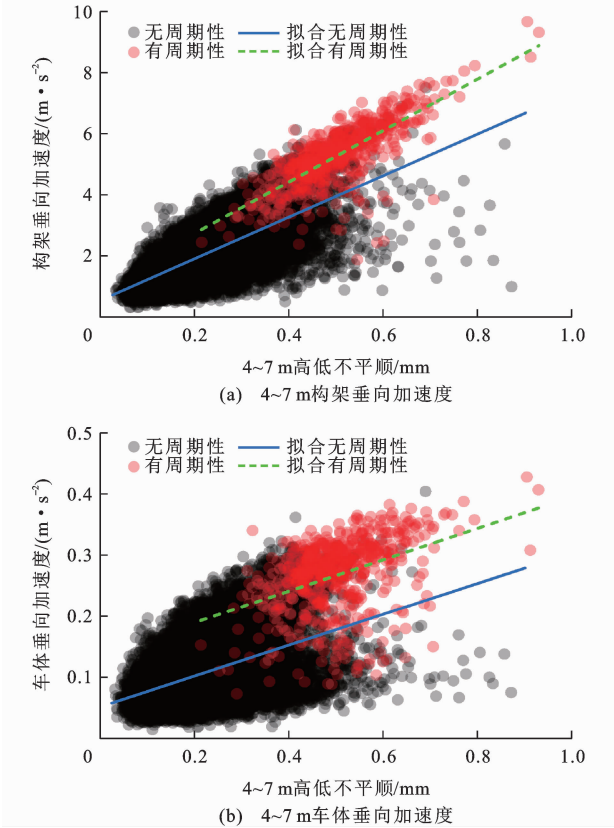


图 11 4~7 m 波段高低不平顺与车辆动态响应分布
Fig. 11 Distribution of longitudinal level and vehicle dynamic response of 4-7 m wavelength band

与 4~7 m 波段高低不平顺 Pearson 相关系数提升了 0.06,相较于 4~7 m 波段车体垂向加速度呈现出更显著的正相关关系。需要指出,仅含轨道板周期性不平顺区段的散点主要集中在散点图右上方区域,并且其 4~7 m 波段构架垂向加速度拟合线幅值要高于全部采样点的拟合线。上述分析表明,构架加速度对 4~7 m 波段的轨道板周期性不平顺更为敏感,相较于车体加速度更适用于作为轨道板周期性不平顺的数据源。

3.2 构架加速度连续多波超限评价方法

前文得出构架垂向加速度对轨道板周期性不平顺较为敏感。因此,在基于高低不平顺的轨道板周期性不平顺识别结果基础上,结合高速综合检测列车检测或运营动车组的构架垂向加速度实测数据,进一步筛选轨道板周期性不平顺影响显著的区段,指导现场养护维修作业。

采用第 1.3 节方法计算 4~7 m 波段构架垂向加速度,然后提取其波峰及波谷值。参考上述车辆动态响应特性分析结果,在基于高低不平顺的轨道板周期性不平顺识别结果基础上,当连续 5 对 4~7 m 波段构架垂向加速度波峰及波谷的绝对值(连续 5 波)超出阈值 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,则判定该区段轨道板周期性不平顺需要重点关注。

当发现存在显著轨道板周期性不平顺且构架垂向加速度超限时,建议尽快开展现场复核;当发现存在一般轨道板周期性不平顺且构架垂向加速度超限时,建议将该处列入下次检查计划;当仅发现存在一般轨道板周期性不平顺时,建议结合后续检测数据关注发展情况。

3.3 评价阈值合理性分析

采用第 2 节方法识别出存在轨道板周期性不平顺的区段,将第 1.4 节统计的 4~7 m 波段高低不平顺和构架垂向加速度的波峰、波谷值按是否存在轨道板周期性不平顺进行分类,4~7 m 波段高低不平顺和构架垂向加速度的箱线图分别如图 12、13 所示。可以看出,不同工况下,4~7 m 小波分解高低不平顺分布规律与 4~7 m 带滤波构架垂向加速度的分布规律较为接近。4~7 m 带滤波构架垂向加速度阈值取 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 可以较好地将存在轨道板周期性不平顺区段从全部数据中分离出来,验证了该阈值的合理性。

3.4 评价效果

基于某高铁 K355+000~K356+600 区间识别出 3 段轨道板周期性不平顺,结果如图 14 所示,包

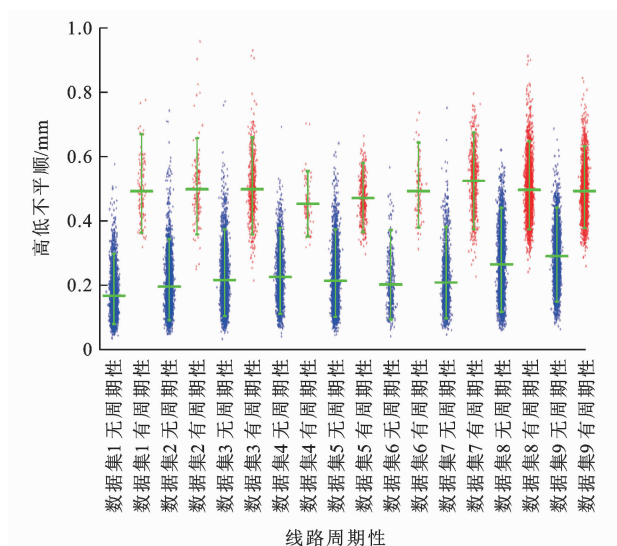


图 12 4~7 m 波段高低不平顺幅值分布

Fig. 12 Amplitude distribution of longitudinal level of 4-7 m wavelength band

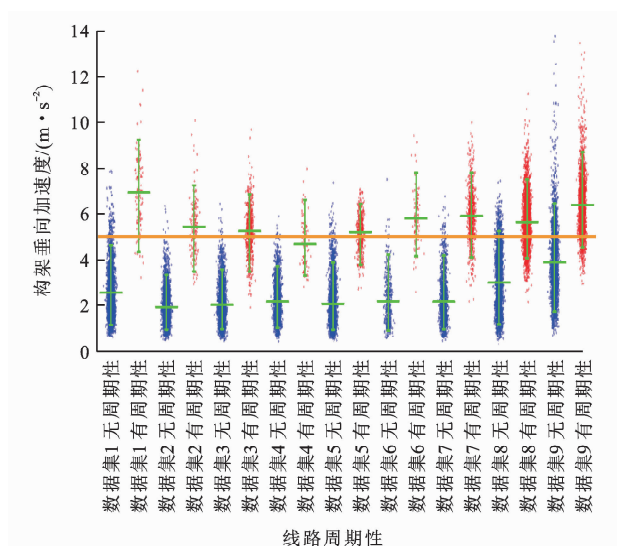


图 13 4~7 m 波段构架垂向加速度幅值分布

Fig. 13 Amplitude distribution of vertical acceleration of frame of 4-7 m wavelength band

括:K355+567~K355+959、K356+130~K356+262、K356+406~K356+508。车速 $295 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,车体垂向加速度最大值 $0.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,垂向平稳性指标最大值 1.88,上述 2 个指标均未超限。4~7 m 波段构架垂向加速度如图 15 所示,其中以下区段存在 4~7 m 波段构架垂向加速度连续 5 波超出阈值 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,包括 K355+600~K355+688、K355+698~K355+857、K355+864~K355+914、K355+922~K355+960、K356+153~K356+264、K356+412~K356+511。4~7 m 波段构架垂向加速度超限区段与轨道板周期性不平顺识别结果基本一致,说明这 3 处轨道板周期性不平顺区段

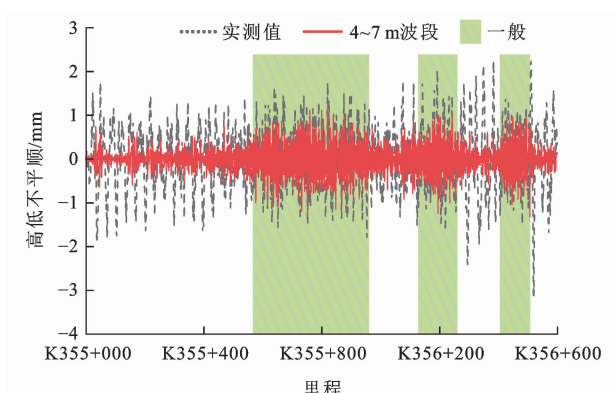


图14 轨道板周期性不平顺识别结果

Fig. 14 Identification result of periodic irregularity in track slab

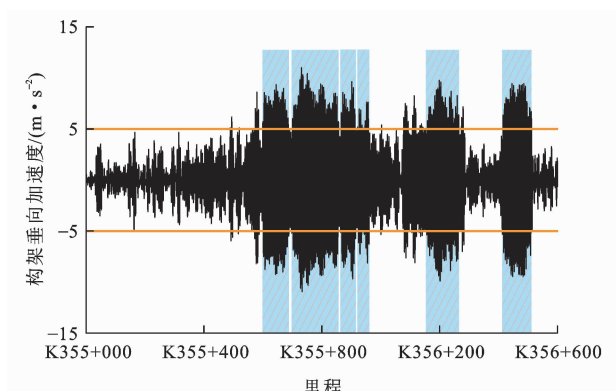


图15 构架垂向加速度

Fig. 15 Vertical acceleration of frame

均需要重点关注。

4 结 语

(1)分析了轨道几何、车辆动态响应等多源动态检测数据在轨道板周期性不平顺区段的分布特征,发现各型无砟线路普遍存在由轨道板变形引起的周期性不平顺,其特征波长与轨道板板长密切相关,主要分布在4~7 m,且构架垂向加速度与轨道板周期性不平顺存在较强的相关性。

(2)提出了融合同步压缩小波变换与变形量计数法的轨道板周期性不平顺识别方法。首先对频率重排后4~7 m波段高低不平顺小波系数进行逆小波同步压缩变换,重构出仅涵盖轨道板周期性不平顺特征波长的信号;随后设计了一种比例计数评判方法,识别存在轨道板周期性不平顺的区段。

(3)为在提高识别准确率的同时尽可能降低漏检率,推荐轨道板周期性不平顺识别方法中的滑动窗长度取50 m,变形量超限计数比例参数 k_1 和 k_2 均取3/4,轨道板周期性不平顺变形量Ⅰ、Ⅱ级阈值可分别取0.8、1.5 mm,识别准确率达92%,将识别结果划分为“周期性显著”“周期性一般”和“无明显

周期性”3个等级。

(4)4~7 m波段构架垂向加速度95%分位数处在 $3.9\sim 8.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,建议将4~7 m波段构架垂向加速度按连续5波超出阈值 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 作为轨道板周期性不平顺对车辆动态响应影响的评价指标,并结合轨道板周期性不平顺区段识别结果指导现场复核与维修作业。

(5)当前评价方法所采用的车辆动态响应数据来源于高速综合检测列车,后续可引入各种型号运营动车组在不同运行工况下的实测数据,以进一步优化识别参数和管理阈值。

参考文献:

References:

- [1] 张鹏飞,徐朗,唐强强,等.考虑行波效应的桥上Ⅲ型板式无砟轨道系统震致响应[J].交通运输工程学报,2025,25(2):283-295.
ZHANG Peng-fei, XU Lang, TANG Qiang-qiang, et al. Seismic response of ballastless track system with Ⅲ-type slab on bridge considering traveling wave effect[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 283-295.
- [2] 赵国堂,赵磊,杨国涛.列车荷载与温度梯度共同作用下单元轨道板层间局部支承效应研究[J].中国铁道科学,2021,42(6):1-7.
ZHAO Guo-tang, ZHAO Lei, YANG Guo-tao. Study on the local support effect between layers of unit track slab under the combined action of vehicle load and temperature gradient[J]. China Railway Science, 2021, 42(6): 1-7.
- [3] REN J J, DU J H, ZHANG K Y, et al. Transfer relation between subgrade frost heave and slab track deformation and vehicle dynamic response in seasonally frozen ground[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2024, 25(2): 130-146.
- [4] 赵磊,蒋典佑,施成.单元双块式无砟轨道翘曲变形特征的试验研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(10):4053-4064.
ZHAO Lei, JIANG Dian-you, SHI Cheng. Experimental study on warping deformation characteristics of unit bi-block ballastless track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(10): 4053-4064.
- [5] 赵磊,杨国涛,刘伟斌,等.单元式无砟轨道周期性变形敏感因素分析[J].铁道工程学报,2024,41(1):26-31,38.
ZHAO Lei, YANG Guo-tao, LIU Wei-bin, et al. Analysis of the sensitive factors of periodic deformation of unit ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(1): 26-31, 38.
- [6] ZHOU R, YUE H H, DU Y L, et al. Experimental and numerical study on interfacial thermal behaviour of CRTS Ⅱ slab track under continuous high temperatures[J]. Engineering Structures, 2023, 284: 115964.

- [7] LOU P, SHI T. Thermal arching and interfacial damage evolution of CRTS-II slab track under solar radiation in alpine and plateau regions [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 74: 301-315.
- [8] 康 熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱[J]. 中国科学(技术科学), 2014, 44(7): 687-696.
KANG Xiong, LIU Xiu-bo, LI Hong-yan, et al. PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2014, 44(7): 687-696.
- [9] 陈宪麦, 董春敏, 魏子龙, 等. 高速铁路 0.01~120 m 波段轨道不平顺功率谱密度函数的构建[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2111-2121.
CHEN Xian-mai, DONG Chun-min, WEI Zi-long, et al. Development on power spectral density function of track irregularity of 0.01-120 m waveband of high-speed railway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2111-2121.
- [10] 陈宪麦, 李鑫海, 徐 磊, 等. 基于 1D-CNN 的无砟轨道 CA 砂浆脱空识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(4): 1645-1655.
CHEN Xian-mai, LI Xin-hai, XU Lei, et al. CA mortar void identification for ballastless track using 1D-CNN[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1645-1655.
- [11] 杨 飞, 孙宪夫, 尤明熙, 等. 考虑周期性不平顺的高速铁路各型无砟轨道谱拟合与反演方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(9): 114-122.
YANG Fei, SUN Xian-fu, YOU Ming-xi, et al. Spectral fitting and inversion method of various ballastless tracks of high-speed railway considering periodic irregularity [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(9): 114-122.
- [12] LU T, CHEN J Y, SUN X F, et al. The stochastic characteristics of wideband-wavelength track irregularity on Chinese HSRs and its application to dynamic wheel-rail interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2025, 63(3): 494-517.
- [13] 李再伟, 雷晓燕, 高 亮. 无砟轨道不平顺对行车安全性影响的可靠性分析[J]. 铁道学报, 2020, 42(10): 101-105.
LI Zai-wei, LEI Xiao-yan, GAO Liang. Reliability analysis of impact of ballastless track irregularity on train operation safety[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10): 101-105.
- [14] 田新宇, 高 亮, 杨 飞, 等. 基于动态短弦的无砟轨道板周期性不平顺管理标准[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 30-38.
TIAN Xin-yu, GAO Liang, YANG Fei, et al. Management standard for cyclic irregularity of ballastless track slab based on dynamic short chord[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 30-38.
- [15] LI G L, GAO M M, YANG F, et al. Study on the threshold for superposed deformation of simply supported bridge creep and track slab upwarp in high-speed railway[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(12): 168781322211439.
- [16] 牛道安, 柯在田, 刘维桢, 等. 高速铁路基础设施检测监测体系框架研究[J]. 中国铁路, 2020(10): 9-17.
NIU Dao-an, KE Zai-tian, LIU Wei-zhen, et al. Research on the inspection and monitoring system framework of high speed railway infrastructure[J]. China Railway, 2020(10): 9-17.
- [17] 杨 飞, 涂文靖, 魏子龙, 等. 铁路工务、电务、供电检测装备发展现状综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 47-69.
YANG Fei, TU Wen-jing, WEI Zi-long, et al. Review on development status of inspection equipment for track maintenance, communication and signaling, and power supply of railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 47-69.
- [18] 赵文博, 杨 飞, 谭社会, 等. 高速铁路轨道周期性不平顺特征表征与识别[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3): 43-52.
ZHAO Wen-bo, YANG Fei, TAN She-hui, et al. Feature representation and identification of periodic irregularity of high-speed railway track[J]. China Railway Science, 2023, 44(3): 43-52.
- [19] TANG X Y, WANG Y, CAI X P, et al. Diagnosis of high-speed railway ballastless track arching based on unsupervised learning framework[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2025, 40(11): 1445-1465.
- [20] 陈岳剑, 李奕璠, 凌 亮, 等. 铁道车辆齿轮箱动力学与故障诊断研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(1): 176-199.
CHEN Yue-jian, LI Yi-fan, LING Liang, et al. Research review on dynamics and fault diagnosis of railway vehicle gearboxes [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(1): 176-199.
- [21] CHANG C, DING X, LING L, et al. Mechanism of high-speed traincarbody shaking due to degradation of wheel-rail contact geometry [J]. International Journal of Rail Transportation, 2023, 11(3): 289-316.
- [22] 钟阳龙, 马超智, 高 亮, 等. 基于车辆响应的无砟轨道路基不均匀沉降评价指标理论研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 147-157.
ZHONG Yang-long, MA Chao-zhi, GAO Liang, et al. Theoretical research on evaluation index of uneven settlement of ballastless track subgrade based on vehicle response[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 147-157.
- [23] XU W Q, GUO Y, YOU M X. Intelligent identification of differential subgrade settlement of ballastless track system based on vehicle dynamic responses and 1D-CNN approach[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 48: 101302.
- [24] MA Z R, GAO L, LIU X B, et al. Detection of CRTS II slab track arching based on dynamic responses of the car body[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130: 105770.
- [25] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.